مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال هجدهم، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۹، شمارهٔ پیاپی ۳٤

DOI: 10.22067/geography.v18i1.80985
مقالهٔ پژوهشی

برآورد حداکثر انرژی پتانسیل باد در استان لرستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

صمد خسروی یگانه (دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران)
samadkhosravi@yahoo.com
مصطفی کرم‌پور (استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران، نویسندهٔ مسئول)
karampoor.m@lu.ac.ir
بهروز نصیری (استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران)
nasiri.b@lu.ac.ir

صص ۳۲۹ ـ ۳۰۵

چکیده

اهداف: هدف این پژوهش، برآورد انرژی پتانسیل باد در سطوح ۳۰ ، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین در ۸ ایستگاه انتخاب شده در استان لرستان است.

روش: در این پژوهش برای برآورد انرژی پتانسیل باد بر پایهٔ داده‌های ساعتی در ۸ ایستگاه انتخاب شده در دورهٔ زمانی ۲۰۰۰–۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اخذ شده از MERRA-2 Modal انجام شده است. برای صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، داده‌های ساعتی سرعت باد از سازمان هواشناسی دریافت شد. برای ارزیابی و صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی در تراز ارتفاعی ۱۰ متری، ضریب همبستگی CC، میانگین خطا ME، مجذور مربعات خطا RMSE و تابع اریبی یا تورش‌دار BIAS محاسبه شده است. پس از صحت‌سنجی داده‌ها برای ترسیم گلباد از نرم‌افزار Windographer و برای برازش داده‌ها از توزیع احتمال ویبول استفاده شد. نیروی چگالی باد سالانه در ترازهای ارتفاعی ۳۰ ، ۵۰ و ۱۰۰ متری محاسبه شد.

یافته‌ها/نتایج: در این تحقیق پس از صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی با میزان خطای ۰/٤۰٤۷۲۱۸ ثابت شد که داده‌های ماهواره‌ای از وضعیت مناسبی برای استفاده در این پژوهش برخوردارند. بر پایهٔ محاسبات، بیشترین انرژی پتانسیل باد در تراز ارتفاعی ۳۰ متری به‌ترتیب به ایستگاه‌های

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱٦ تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۰٦/۱۰

بروجرد، الشتر، کمالوند، ازنا، الیگودرز، نورآباد، دورود و کوهدشت با ۱۲۸ ، ۱۰۲، ۹۸ ، ۸٦ ، ٦۹ ، ۵۷ ، ۵۰ و ٤۱ وات بر مترمربع در ساعت اختصاص دارد که این مقادیر در ترازهای۵۰ و ۱۰۰ متری با یک نسبت مشخص و با همین ترتیب در تراز ۳۰ متری برای دیگر ترازهای ارتفاعی در همهٔ ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد.
نتیجه‌گیری: ایستگاه‌های بروجرد، الشتر، نورآباد، ازنا و کمالوند در ترازهای ارتفاعی ۳۰ ، ۵۰ و ۱۰۰ متری و ایستگاه‌های الیگودرز، کوهدشت و دورود فقط در سطح ۱۰۰ متری از سطح زمین پتانسیل مناسبی برای تولید انرژی از نیروی چگالی باد با توجه به نوع ارتفاع توربین بادی دارند.
کلیدواژه‌ها: توزیع ویبول، نیروی چگالی باد، دادهٔ ماهواره‌ای، استان لرستان.

۱. مقدمه

از دیرباز انسان به باد به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین منابع انرژی توجه داشته و آن را به کار برده است. استفادهٔ مستقیم از باد به‌صورت خشک‌کردن و تهویه و استفادهٔ غیرمستقیم از آن به صورت تبدیل انرژی جریان باد به انواع مختلف انرژی برای آردکردن غلات، پمپاژ آب به مزارع و استفاده از آن در شبکهٔ سراسری برق است. طی سالیان دراز ثابت شده است که می‌توان از انرژی باد به صورت مکانیکی و الکتریکی استفاده کرد. از طرف دیگر، منابع انرژی فسیلی مشکلات و هزینه‌های مادی و زیست‌محیطی خاص خود را دارد. استفاده از انرژی اتمی نیز صرف نظر از پیامدهای شدید زیست‌محیطی نظیر زبالهٔ هسته‌ای و غیره، هزینهٔ زیاد وتکنولوژی پیشرفته‌ای را می‌طلبد. این موضوع سبب شده است که بشر همواره درپی منابع انرژی نو برای جایگزینی دو منبع انرژی ذکرشده باشد؛ منابعی که نه‌تنها ارزان‌قیمت و در دسترس هستند، بلکه مصرف آن‌ها آلودگی چندانی نداشته باشد. از مجموع انرژی‌های یادشده به نظر می‌رسد که استفاده از انرژی‌های خورشید و باد در کشور ایران اقتصادی‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تر باشد. استفاده از انرژی خورشیدی بر سایر روش‌های تولید انرژی‌های نو برتری دارد، اما نباید از این نکته غافل شد که اول اینکه بازده استفاده از سلول‌های فتوولتانیک در تبدیل انرژی خورشیدی به برق حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد است و دوم اینکه استفاده از انرژی خورشیدی مستلزم صرف هزینه‌های زیادی است. این موضوع سبب شده است که امروزه

توجه بسیاری به انرژی باد معطوف شود؛ زیرا تجدیدپذیر است و میـزان تولیـد آن بـه میـزان ذخایر آن در دیگر نقاط دنیا وابسته نیست. همچنین، به‌دلیل پخش‌بودن و متمرکزنبودن نیروگاه در مواقع جنگ و سایر بلایای طبیعی، آسیب‌پذیری کمتری در مقایسه با نیروگاه‌هـای متمرکـز دارد (ثقفـی، ۱۳۷۲، ص. ۱۲). ماهیـت پایان‌ناپـذیربودن انـرژی بـاد و کـاهش خطـرات زیست‌محیطی موجب شده است که در حال حاضر انرژی باد نقش مهمی در تولید انـرژی در جهان داشته باشد؛ ازاین‌رو کشورهای مختلف سـعی در اسـتفاده از آن در کنـار دیگـر منـابع انرژی دارند. به نظر می‌رسد در آیندهٔ نزدیک استفاده از این انرژی به‌طور چشمگیری افـزایش یابد؛ این در حالی است که دستیابی به حداکثر استفاده از آن مستلزم چگـونگی مکـان‌گزینـی نیروگاه‌های بادی و انتخاب توربین‌های بادی متناسب با سرعت باد است. بررسـی جـایگزینی سوخت‌های فسیلی با انرژی‌های پاک و تجدیدپـذیر در اسـتان و بهره‌بـرداری از انـرژی بـاد به‌دلیل ضرورت‌های زیست‌محیطی، تنوع بخشیدن به منابع انرژی و وابستگی نداشتن به دیگر استان‌ها در زمینهٔ انرژی از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این پژوهش بـه ارزیـابی انـرژی پتانسیل باد پرداخته شده است تا در صورت مناسب بودن شرایط، زمینهٔ استفاده از انرژی بـاد در استان فراهم شود.

۲. پیشینهٔ تحقیق

از تحقیقات انجام شده در داخل و خارج از کشور که به بررسی و پتانسیل‌سـنجی انـرژی باد پرداخته‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بیلال، ندونگو ، کبه ، سامبو و ندیای[۱] (۲۰۱۳) امکان‌سنجی با استفاده از انـرژی بـاد بـرای تولید برق در ساحل شمال غرب سنگال را بررسی کردند. نتایج نشان داد چگالی توان باد بین ۱۲۰/۰۱ تا ۳۰/۰۵ وات بر متر مربع است. بیشـترین ظرفیـت تولیـد بـاد در منطقـهٔ سـاخور و کمترین میزان تولید انرژی در گاندون است. هاروی[۲] (۲۰۱۳) پتانسیل انـرژی بـاد را بـه‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی در کانادا بررسی کرد. وی برای بررسی قدرت توربین‌های

1. Bailal, Ndongo, Kebe, Sambou &Ndiaye
2. Harvey

بادی از داده‌های انرژی باد اطلس کانادا استفاده کـرد. نتـایج نشـان داد کـه در کانـادا منـاطق پراکنده‌ای با ظرفیت بیشتر از ۰/٤ و برخی بیشتر از ۰/۵ وجود دارد و سرمایهٔ مزرعهٔ بـادی در حدود ۲۰۰۰ دلار در هر کیلو وات بر کیلومتر مربع و ۰/۷۵ دلـار، بـه‌ترتیب بـرای خشـکی و دریاست. مورث، بلاسوبرامانیان و دشموخ[1] (۲۰۱۷) با به‌کارگیری نرم‌افـزار Windographer و داده‌های ماهواره‌ای به ارزیابی و بررسی انرژی پتانسیل باد در سطح ۵۰ متری از سطح زمین در کشور هندوستان پرداختند. نتایج نشان داد میانگین سرعت باد در این کشور ۵/۵۸ متـر بـر ثانیه با توان تولیدی ۳۳٦ وات بر متر مربع در سال است.

انتظاری و امیراحمدی (۱۳۹۱) پتانسیل انرژی باد و امکان‌سنجی احداث نیروگاه بـادی در سبزوار را بررسی کردند. آن‌ها از داده‌های روزانه و ساعتی سمت و سرعت باد در دورهٔ زمانی ۱۹۸۷–۲۰۰۷ با استفاده از روش‌های آماری و ریاضی، مقدار انرژی پتانسیل بـاد را در ارتفـاع ۱۰ متری محاسبه کردند. نتایج نشان داد تندی متوسط سالانهٔ باد در این ایستگاه ۲/۵۳ متـر بـر ثانیه بوده است. بختیاری، بذرافشان و خانجانی (۱۳۹۲) پتانسیل انرژی باد بر مبنـای داده‌هـای کوتاه‌مدت ۱۰ دقیقه‌ای در مناطق کرمان، جیرفت و بم را با استفاده از توزیع احتمال و محاسبهٔ تابع چگالی بررسی کردند. نتایج نشان داد ایستگاه بم از نظر متوسط تندی باد، درصد فراوانی باد غالب، ضریب تداوم تندی و تابع چگالی توان باد، در مقایسه با دو ایسـتگاه دیگـر برتـری دارد و چگـالی تـوان بـاد در ایسـتگاه بـم ٢٤٥٥/٤ سـاعت در سـال اسـت. رضـایی بنفشـه، جهانبخش، دین‌پژوه و اسمعیل پور (۱۳۹۳) امکـان‌سـنجی اسـتفاده از انـرژی بـاد را در پـنج ایستگاه همدید واقع در استان‌های اردبیل و زنجان بررسی کردند. در میان ایستگاه‌های مطالعـه شده، ایستگاه اردبیل با ۲۸۵/۵۹ وات بر متر مربع در ارتفاع ٤۰ متری از بیشترین چگالی تـوان باد برخودار بود. فاضل‌پور، مارکاریان و سلطانی (۲۰۱۷) برای برآورد و ارزیابی انرژی پتانسیل باد در استان سیستان‌وبلوچستان از نرم‌افزار Windographer و داده‌های مـاهواره‌ای اسـتفاده کردند. نتایج نشان داد زاهدان، زابل و زهک در این استان دارای ظرفیت بیشتری بـرای تولیـد انرژی از نیروی چگالی باد هستند. عساکره، بیرانوند و دوسـت‌کامیـان (۲۰۱۸) بـرای ارزیـابی قدرت باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل از نرم‌افـزار Windographer در دورهٔ زمـانی ۲۰۰۸–

1. Moorthy, Balasubramanian & Dashmukh

۱۹۹۰ استفاده کردند. نتایج نشان داد میانگین سرعت باد در ایستگاه اردبیل ۷/٤ متـر بـر ثانیـه است و راندمان انرژی باد در جهت جنوب غربی است.

با توجه به مطالعات، آنچه باعث تمایز پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های دیگر می‌شـود، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای به دست آوردن انرژی پتانسیل باد در استان لرستان است. دلیل استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزار Windographer این است که منطقهٔ مدنظر از نظر توپوگرافی و سایر شرایط طبیعی دارای وضعیت خاصی است که هریک از شرایط طبیعی و توپوگرافی به‌نوعی باعث می‌شوند سرعت و جهت وزش باد در منطقهٔ مدنظر از تغییرپذیری زیادی برخودار باشد؛ بنابراین با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و نرم‌افزار یاد شده به بررسی و محاسبهٔ نیروی چگالی باد به‌منظور جایگزینی انرژی باد با سایر منابع انرژی موجود در اسـتان لرستان پرداخته شد تا بتوان به دیدگاهی جامع و کامل دربارهٔ این موضوع دست یافت.

۳. روش‌شناسی تحقیق

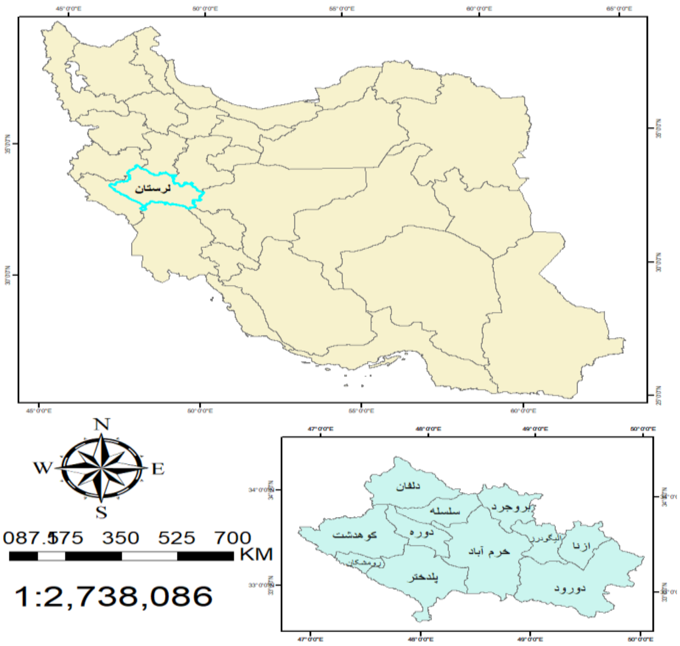
۱.۳. معرفی پایگاه دادهٔ MERRA-2 Modal

مرکز تجزیه و تحلیل نوین ناسا برای پژوهش‌ها و برنامه‌هـای کـاربردی MERRA[1] یـک مجموعه داده‌ای اتمسفری-بازتحلیل است (راینکـر[2] و همکـاران، ۲۰۱۱، ص. ۱۲، بـه نقـل از شکری کوچک، آخونـدعلی و شـریفی، ۱۳۹۸، ص. ۵۹) کـه دفتـر جهـانی هماهنگ‌سـازی و مدل‌سازی ناسا (GMAO) ایجاد کرده است. این پایگاه دادهٔ بازتحلیل که از نسـخهٔ ۵ سـامانهٔ مشاهدات زمینی Goddard (GEOS-5) است و یک مـدل گـردش عمـومی جـو اسـت، از سامانهٔ داده‌گواری (DAS)[3] استفاده می‌کند و به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مشاهدات می پردازد و با ترکیب داده‌های مدل به‌کارگرفتـه‌شـده و مشـاهدات نـامنظم مکـانی و زمـانی، مجموعـه داده‌های شبکه‌بندی و نقطه‌ای را با دقت مناسب تولید می‌کند (رایل رانجل[4]، ۲۰۱۷، ص. ۱۵ به نقل از عباس‌زاده مزوجی، ۱۳۹۰).

1. Modern- Era Retrrospective Analysis For Research and Applications
2 .Suarez,Gelaro,Todling,Bacmeister,Liu,Bosilovich & Reinker
3. Data Assimlation system
4. Rail Rangel

۳. ۲. محدودهٔ جغرافیایی پژوهش

محدودهٔ مطالعاتی این پژوهش مطابق با شکل (۱) استان لرستان است که در غرب کشـور ایران بین ٤٦ درجه و ٥١ دقیقه تا ٥٠ درجه و ۳ دقیقهٔ طول شرقی از نصف‌النهار گرینـویچ و ۳۲ درجه و ۳۷ دقیقهٔ عرض شمالی واقع شده است.



شکل ۱- نقشهٔ منطقهٔ مورد مطالعه

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

۳. ۳. روش تحقیق

برآورد خطای داده‌های ماهواره‌ای به‌کارگرفته‌شده با داده‌های ایستگاهی

برای مقایسهٔ کمی و اعتبارسنجی برآوردهای سرعت باد در مقیاس زمـانی سـاعتی پایگـاه دادهٔ MERRA-2 Modal از معیارهای آماری خطای مختلفی استفاده می‌شـود. بـا تجزیـه و تحلیل آماره‌ها می‌توان نتایج مناسبی در زمینهٔ موفقیت و مناسب‌بودن داده‌های این پایگـاه دادهٔ

بازتحلیل کسب کرد. این آماره‌ها عبارت‌اند از: ضریب همبستگی[۱]، میانگین خطا [۲] و مجذور میانگین مربعات خطا [۳]. روابط ۱ تا ٤ مربوط به محاسبهٔ آماری خطاست.

رابطهٔ ۱:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^{N}(o_i - \bar{o}) \times (s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(o_i - \bar{o})^2 \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(s_i - \bar{s})^2}}}$$

رابطهٔ ۲:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{N}(s_i - o_i)}{N}$$

رابطهٔ ۳:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(s_i - o_i)^2}{N}}$$

o مقدار دادهٔ مشاهده‌ای (ایستگاهی) و s مقدار دادهٔ ماهواره‌ای است. ضریب همبستگی، میزان انطباق داده‌ها را نشان می‌دهد. میانگین خطاها به‌طور کلی بیش‌آورد بودن و کم‌برآورد بودن پایگاه داده را تعیین می‌کند. RMSE شاخصی برای میزان خطاها و معیاری برای عملکرد مجموعه داده‌های ماهواره‌ای است.

محاسبهٔ تابع اریبی یا تورش‌دار[٤]

در آمار و ریاضیات، تابع اریبی، تورش یک برآوردگر همان اختلاف بین امید ریاضی آن برآوردگر و مقدار دادهٔ واقعی (ایستگاهی) است. به عبارت ریاضی فرض کنید X_i ,I,= $1, \dots \dots \dots n$ براساس توزیع $p(X|\theta)$ توزیع شده باشد و $\hat{\theta}$ یک تخمینگر براساس داده‌های مشاهده‌ای است. اریبی $\hat{\theta}$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

رابطهٔ ٤:

$$BIAS[\hat{\theta}] = E[\hat{\theta}] - \theta = E[\hat{\theta} - \theta]$$

1. Crrelation Coefficient (CC)
2. Mean Squared Error (ME)
3. Root Mean Squaer Deviation (RMSE)
4. Bias

در این رابطه، E امید ریاضی متغیر X، نسبت به توزیع $P(X|\theta)$ است (مروتی و شکوهی، ۱۳۹۳، ص. ٤٤). نتایج صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی در دورهٔ زمانی ۲۰۰۰–۲۰۱۹ در جدول ۱ ارائه شده است. به‌منظور پتانسیل‌سنجی انرژی باد در استان لرستان از میانگین داده‌های (سرعت و جهت) باد استفاده شده است. داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از نوع داده‌های بازکاوی‌شدهٔ ماهواره‌ای هستند و زمان اندازه‌گیری داده‌های استفاده‌شده ٢٤ بار در طی شبانه‌روز بوده است یا به‌عبارتی هر ساعت یک بار داده‌ها ثبت شده‌اند و توسط مدل MERRA- 2Model با دقت تفکیک مکانی ۰/۵ × ۰/٦۲۵ درجه مهیا شده است. داده‌ها در دورهٔ زمانی ۲۰۰۰–۲۰۱۹ و در سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین هستند که استفاده شده‌اند. در این پژوهش از نرم‌افزار windographerاستفاده شده است که خروجی این نرم‌افزار شامل میزان میانگین سرعت باد سالانه برحسب متر بر ثانیه، محاسبهٔ پارامترهای توزیع آماری ویبول k و c و نیروی چگالی باد برحسب وات بر متر مربع و رسم گلباد در هریک از سطوح مختلف می‌شود. برای تمامی محاسبات و آنالیز عددی داده‌ها از این نرم‌افزار استفاده شده است. پارامترهای مندرج در جداول ۲، ۳ و ٤ براساس رابطه‌های ذیل محاسبه شده است. برای محاسبهٔ الگوریتم حداکثر درست‌نمایی[1] از رابطهٔ ۵ استفاده شده است.

رابطهٔ ۵:

$$K = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} U_i^k}{\sum_{i=1}^{N} U_i^k} - \frac{\sum_i^N \ln(U_i)}{N}\right]^{-1}$$

در این رابطه U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، N تعداد اندازه‌گیری‌های ثبت شدهٔ داده و K فاکتور تابع توزیع آماری ویبول[2] هستند. تابع توزیع ویبول دوپارامتره و شکل خاص آن یکی از بهترین توابع برای برازش به داده‌های سرعت باد است که برای توزیع پیوستهٔ سرعت باد از مقادیر گسستهٔ مشاهده‌ای بسیار مناسب است (جاستوس و هارگراوز[3]، ۱۹۷۸، ص. ۳۳). برای محاسبهٔ پارامتر ویبول C از رابطهٔ ٦ بهره گرفته شده است.

1. Maximumlikelihood
2. Weibull
3. Justus, & Hargraves

رابطهٔ ٦:

$$C = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} U_i^k}{N}\right)^{\frac{1}{k}}$$

در این رابطه، U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، N تعداد دادهٔ ثبت‌شده و K فاکتور تـابع توزیع آماری ویبول K است (استیونز و سمولدرز[1]، ۱۹۷۹، ص. ١٤). بـرای محاسـبهٔ پـارامتر ویبول C از رابطهٔ ٦ بهره گرفته شده است. با استفاده از رابطهٔ ۷ الگوریتم حـداقل مربعـات[2] محاسبه می‌شود.

رابطهٔ ۷:

$$F(U) = 1 - exp\left[-\left(\frac{U}{C}\right)^k\right]$$

$$-ln[1 - F(U)] = \left(\frac{U}{C}\right)^k$$

$$ln\left[\frac{1}{1 - F(U)}\right] = \left(\frac{U}{C}\right)^k$$

$$ln\left\{ln\left[\frac{1}{1 - F(U)}\right]\right\} = Kln\left(\frac{U}{C}\right)$$

$$ln\left\{ln\left[\frac{1}{1 - F(U)}\right]\right\} = KlnU - KlnC$$

رابطهٔ ۷، یک رابطهٔ خطی است که طرف چپ آن متغیر وابسته (y) و ln(U) متغیر مستقل (x) فرض می‌شود. مقدار k از شیب خط به دست می‌آید. با قرائت مقدار k از روی نمودار و مساوی قراردادن حاصل آن با $-k \ln(n)$ مقدار c را می‌توان محاسبه کرد.

با استفاده از رابطهٔ ۸ نیروی چگالی باد برحسب وات بر متر مربع محاسبه می‌شود.

رابطهٔ ۸:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho U^3$$

1. Stevens & Sumlders
2. Lastsquares

در این رابطه، $\frac{P}{A}$ نیروی چگالی باد برحسب وات بر مترمربع و ρ چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متر مکعب و U^3 توان سوم سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است.

با استفاده از رابطهٔ ۹ پارامتر ویبول C محاسبه می‌شود.

رابطهٔ ۹:

$$\bar{U} = C\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)$$

دررابطهٔ ۹، $\bar{U}$ میانگین سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، Γ فاکتور تابع آماری گاما[1] و k فاکتور توزیع آماری ویبول K و C فاکتور ویبول C است.

رابطهٔ ۱۰:

$$F(U) = \left(\frac{U}{C}\right)^{k-1}.exp\left[-\left(\frac{U}{C}\right)^{k}\right]$$

$$F(U) = 1 - exp\left[-\left(\frac{U}{C}\right)^{k}\right]$$

در رابطهٔ ۱۰، پارامتر ویبول K که در جداول آمده است، با بهره‌گیری از رابطهٔ ٦ محاسبه می‌شود. در این رابطه، U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه، C فاکتور تابع توزیع آماری ویبول C و K فاکتور تابع توزیع آماری ویبول K است (صلاحی ، ۱۳۸۳، ص. ۲۵). در این پژوهش عدم قطعیت[2] در داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از رابطهٔ ۱۱ برآورد شده است.

رابطهٔ ۱۱:

عدم قطعیت داده‌های ماهواره‌ای با استفاده از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شود. X الگوریتم «نسبت متغیر» رابطهٔ خطی بین سرعت باد سایت مدنظر و سرعت سایت مرجع است.

رابطهٔ ۱۲. ۱:

$$\hat{Y} = mx + b$$

1. Gamma
2. Uncertainty

هدف این الگوریتم تولید مجموعه‌ای از سرعت‌های باد پیش‌بینی‌شده است که میـانگین و واریانس آن برابر با سرعت باد اندازه‌گیری‌شده است. برای دستیابی به ایـن هـدف، شـیب از معادلهٔ زیر پیروی می‌کند:

$$m = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$$

و رهگیری باید از معادله زیر پیروی کند:

$$b = \bar{y} - m\bar{x}$$

همان‌طور که تیلور[1] (۱۹۹۷، ص. ۱۲۲) بیان می‌کند، عدم قطعیت کسری بـرای مقـادیر بـه درجهٔ چهار افزوده می‌شود؛ مشروط به اینکه خطاها به‌صورت غیرمرتبط و به‌طور عادی توزیع شوند؛ بنابراین پیداکردن عدم قطعیت پارامتر شیب برابر است با:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\sigma_x}}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\sigma_y}}{\sigma_y}\right)^2}$$

این‌معادله بیان می‌کند که عدم قطعیت کسری در شیب برابر است بـا میـانگین ریشـهٔ دوم عدم قطعیت کسری در انحرافات استاندارد. تیلور (۱۹۹۷، ص. ۱۲۲) اظهار کرد عدم قطعیـت انحراف استاندارد از هر متغیر را با جایگزین‌کردن این معادله بـرای عـدم قطعیـت کسـری در شیب متوجه می‌شویم:

$$\sigma_{\sigma_x} = \frac{\sigma_x}{2\sqrt{N-1}}$$

$$\frac{\sigma_{\sigma_x}}{\sigma_x} = \frac{\sigma_{\sigma_y}}{\sigma_y} = \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}$$

این معادله بیان می‌کند، عدم قطعیت کسری در شیب برابر است با میانگین ریشهٔ دوم عدم قطعیت کسری در انحرافات استاندارد. تیلور (۱۹۹۷، ص. ۱۰۲) بیان کرد عدم قطعیت انحراف استاندارد از هر متغیر را با جایگزین‌کردن X این معادله برای عدم قطعیـت کسـری در شـیب متوجه می‌شویم:

1. Taylor

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{2\sqrt{(N-1)}}\right)} = \sqrt{\frac{1}{N-1}}$$

بنابراین عدم قطعیت کسری در شیب برابر است با:

رابطهٔ ۱۲. ۲:

$$\frac{\sigma_m}{m} = \sqrt{\frac{1}{N-1}}$$

$$\sigma_m = \frac{m}{\sqrt{N-1}}$$

رابطهٔ ۱۲. ۳:

$$\sigma_b = \sqrt{(\sigma_{\bar{y}})^2 + (\sigma_{m\bar{x}})^2}$$

رابطهٔ ۱۲. ٤:

پارامتر رهگیری را با استفاده از روابط زیر پیدا می‌کنیم. حال برای پیداکردن عدم قطعیت در معادلهٔ قطعیت مطلق مقادیر به چهار درجه اضافه می‌کند. با استفاده از این معادله می‌توانیم بنویسیم:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}$$

$$\frac{\sigma_{m\bar{x}}}{mx} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}}\right)^2}$$

$$\sigma_{m\bar{x}} = m\bar{x} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\bar{x}}}{x}\right)^2}$$

بنابراین می‌توانیم دوباره عدم قطعیت کسری را در رده‌بندی اضافه کنیم:

$$\sigma_{m\bar{x}} = m\bar{x}\sqrt{\left(\sqrt{\frac{1}{N-1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_x}{x\sqrt{N}}\right)^2}$$

$$= m\bar{x}\sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right)+\left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right)}$$

$$= \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\bar{x}\sqrt{\left(\frac{1}{N-1}\right)+\left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right)}$$

جایگزین‌کردن معادلهٔ بالا در معادلهٔ ۳ می‌دهد:

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sigma_y^2}{N}+\frac{\bar{x}^2}{\sigma_x^2}\left[\left(\frac{1}{N-1}\right)+\left(\frac{\sigma_x^2}{N_{\bar{x}}^2}\right)\right]}$$

$$= \sigma_y\sqrt{\frac{1}{N}+\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2}\left[\left(\frac{1}{N-1}\right)+\left(\frac{\sigma_x^2}{N\bar{x}^2}\right)\right]}$$

$$= \sigma_y\sqrt{\frac{2}{N}+\left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2\left(\frac{1}{(N-1)}\right)}$$

بنابراین عدم قطعیت در رهگیری توسط معادلهٔ زیر آورده شده است:

$$\sigma_b = \sigma_y\sqrt{\frac{2}{N}+\left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2\left(\frac{1}{(N-1)}\right)}$$

در این رابطه، σ انحراف معیار داده‌ها، N تعداد کل داده‌ها، $\bar{x}$ میانگین داده‌ها و x_i هرکدام از داده‌ها هستند که در این رابطه برآورد شده‌اند (تیلور، ۱۹۹۷). با استفاده از رابطه‌های ذکرشده، هریک از الگوریتم‌ها و پارامترهای مندرج در جداول سه‌گانه (در سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین) در محیط نرم‌افزار Windographer محاسبه شده است (تیلور، ۱۹۹۷، ص. ٥٦).

محاسبهٔ توان تولیدی توربین‌ها

رابطهٔ ۱۳:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U^3}$$

در این رابطه، ρ چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر متـر مکعـب، A منطقـهٔ جـاروب شـده توسط پرهٔ توربین برحسب متر مربع (این پارامتر برای هـر نـوع تـوربین متفـاوت اسـت)، U سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و P قدرت الکتریکی تولیدشده توسط توربین برحسـب وات است. لازم است توضیح داده شود که بازده پره‌های توربین بادی عبارت است از تبدیل انرژی جنبشی که پره‌ها از باد می‌گیرد، به انرژی جنبشی کل باد که از مقابل پـره‌هـا عبـور مـی‌کنـد. پره‌های توربین کل انرژی جنبشی را از باد نمی‌گیرند؛ زیرا در این صورت پس از برخـورد بـا پره‌ها سرعتش به صفر می‌رشد و متوقف می‌شود. بنا بر تئوری فیزیکدان آلمانی، بتز[1]، ضـریب توان نمی‌تواند از ١٦/٢٧ یا تقریباً از ۰/۵۹ تجاوز کند؛ مقداری که به حـد بتـز معـروف اسـت (صلاحی و همکاران، ۱۳۸۳، ص. ۱۲).

توربین‌های کنترل‌شده

برای یک توربین بادی کنترل‌شده از زمین با استفاده از معادلهٔ زیر، «سرعت باد مؤثر» ناشی از چگالی هوای فعلی محاسبه می‌شود:

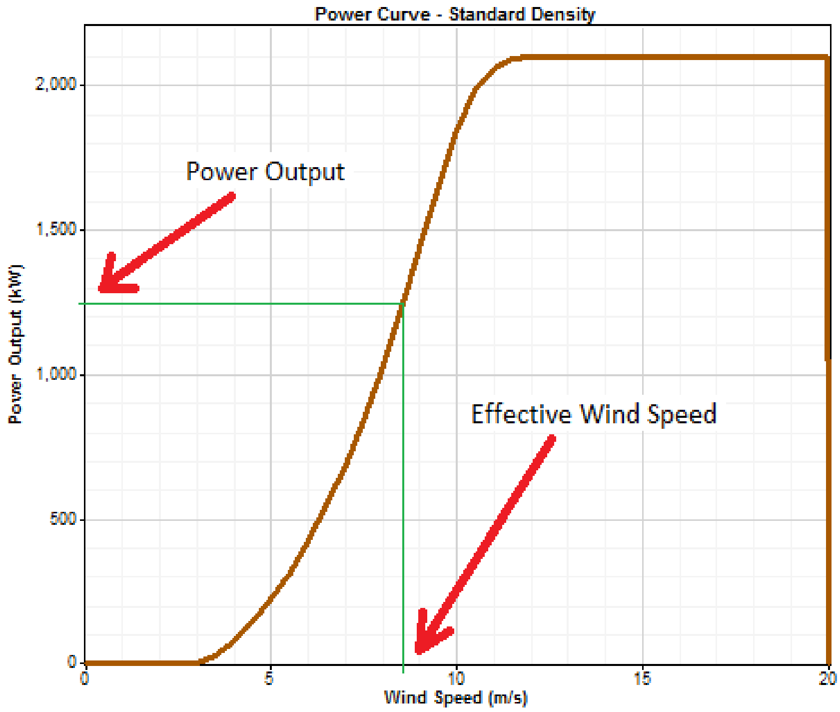
رابطهٔ ١٤:

$$U_{\mathcal{FF}} = \mathrm{U}.\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{1}{3}}$$

U سرعت باد ثبت‌شده برحسب متر بر ثانیه، ρ چگـالی هـوا برحسـب کیلـوگرم بـر متـر مکعب و ρ_0 چگالی هواست برحسب کیلوگرم بر متر مکعب که نیرو بر آن اعمال می‌شـود.

پس از محاسبهٔ سرعت باد مؤثر، از آن برای محاسـبهٔ تـوان تولیدشـده توسـط تـوربین بـادی استفاده می‌شود. همان‌طور که نمودار زیر نشان می‌دهد.

1. Betz



شکل ۲- نمودار توان خروجی توربین در زمان باد مؤثر

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

به‌عنوان‌مثال، موردی را در نظر بگیرید که منحنی نیـرو در تـراکم اسـتاندارد هـوا (۱/۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) اعمال می‌شود و در یک دورهٔ ۱۰ دقیقه‌ای خاص سرعت باد ۸/۸ متـر بر ثانیه و تراکم هوا ۱/۱۰ متر بر ثانیه است. معادلهٔ ذکرشده سرعت باد مؤثر ۸/۵ متر در ثانیـه را به دست می‌دهد؛ یعنی باد ۸/۵ متر بر ثانیه در تراکم هوای استاندارد می‌تواند همان انرژی را بادی که در ۸/۸ متر بر ثانیه در جریان است، در تراکم هوای کمتر از ۱/۱۰ متر بر ثانیه داشـته باشد (تیلور، ۱۹۹۷، ص. ۵۵).

٤. یافته‌های تحقیق

ارزیابی صحت داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با صحت داده‌های ایستگاهی در تراز ارتفاعی ۱۰متری

در جدول ۱ معیارهای آماری و صحت‌سنجی بین داده‌های[1] باد در تراز ۱۰ متری دریافت شده از MERRA- 2Model و داده‌های ایستگاهی دریافت شده از سازمان هواشناسی مربوط به داده‌های سرعت باد ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک در منطقهٔ مورد پژوهش در دورهٔ زمانی ۲۰۰۰–۲۰۱۹ ارائه شده است. با توجه به محاسبات انجام شده در این جدول، آمارهٔ ضریب همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌ها بسیار مناسب است. میانگین تمامی آمارهای ضریب همبستگی، میانگین خطا و مجذور مربعات در ۸ ایستگاه انتخاب شده بین داده‌های ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاهی ۰/٤٠٤٧٢١٨ است. به بیان دیگر، هرچه این میزان به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهندهٔ خطای کمتر داده‌های ماهواره ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی است.

جدول ۱– معیارهای آماری صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های ایستگاهی

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	دادهٔ ایستگاه	دادهٔ ماهواره	BIAS	MAE	RMSE	CC	
بروجرد	۳/٤	٤/۱٤	۰/۷٤	۰/۷٤	۰/٥٤۷٦	۰/٥٤۷٦	۰/۳۱۲۲۰۱٦
الیگودرز	٤/۷	۳/۷٦	-۰/۹٤	۰/۹٤	۰/۸۸۳٦	۰/۸۸۳٦	۰/٤٥٤۹٥۱٦
الشتر	۲/٥٦	۳/۱	۰/٥٤	۰/٥٤	۰/۲۹۱٦	۰/۲۹۱٦	۰/۰۷۹۱۰۱٦
کوهدشت	۲/۰۸	۲/٥۷	۰/٤۹	۰/٤۹	۰/۲٤۰۱	۰/۲٤۰۱	۰/٥۷۹٥۰۱٦
نورآباد	۱/٦٤	۱/۷۷	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۰۱٦۹	۰/۰۱٦۹	۱/٤٤۳۰۰۱٦
کمالوند[2]	۲/٤	۳	۰/٦	۰/٦	۰/۳٦	۰/۳٦	۰/۱۹٤۷۰۱٦

---

۱. نرم افزار Windographer این قابلیت را دارد که بتوان از داده‌های دریافت‌شده از MERRA- 2Model از یک منطقه، داده‌های دیگر ترازهای ارتفاعی ده‌گانه، به طور مثال ۱۰ تا ۲۰۰ متری را از یکدیگر تفکیک کرد.

۲. کمالوند منطقه‌ای در شمال شرقی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک خرم‌آباد است. نرم‌افزار به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش این قابلیت را دارد که برای هر منطقهٔ دلخواه دادهٔ ماهواره‌ای آن را دریافت کند. در این پژوهش از داده‌های ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد (نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقهٔ کمالوند) برای صحت‌سنجی داده‌های ماهواره ای کمالوند در مقایسه با داده‌های ایستگاهی استفاده شده است.

نام ایستگاه	دادهٔ ایستگاه	دادهٔ ماهواره	BIAS	MAE	RMSE	CC	
دورود	۳/٤	۳/۱	۰/۳-	۰/۳	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۳۱۲۲۱٦
ازنا	۲/٥٥	۲/۹۸	۰/٤۳	۰/٤۳	۰/۱۸٤۹	۰/۱۸٤۹	۰/۰۸٤۸۲٦٦
متوسط	۲/۸٤۱۲٥	۳/۰٥۲٥	۰/۲۱۱۲٥	۰/٥۲۱۲٥	۰/۳۲٦۸۳۸	۲/٦۱٤۷	٦/٤٦۰٤۸۷٥
					۰/٥۷۱٦۹۷		۰/٤۰٤۷۲۱۸

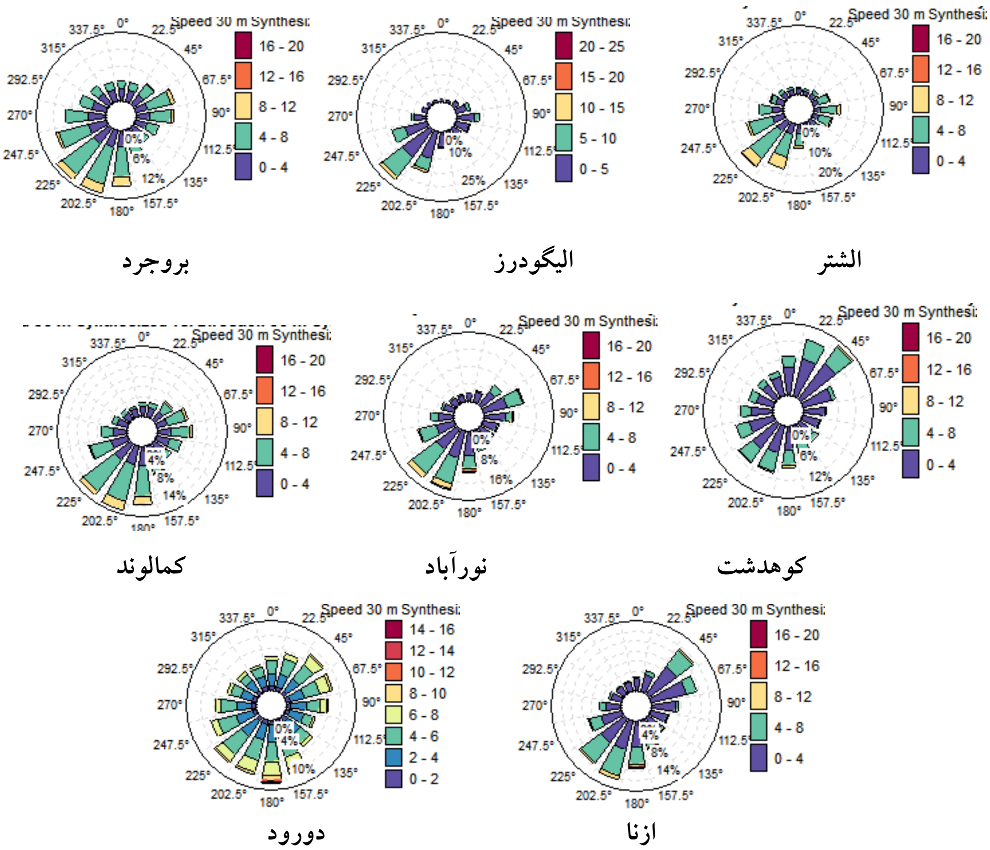
بهترین راه برای ارزیابی منبع باد موجود در یک منطقه، محاسبهٔ مقادیر چگالی توان باد است که نشان می‌دهد چه مقدار انرژی در آن منطقه برای تبدیل به انرژی الکتریسیته توسط توربین بادی وجود دارد. همان‌طور که در جداول ۱، ۲و ۳ مشاهده می‌شود، تمامی پارامترهای مربوط به باد ازجمله توزیع آماری ویبول k و c و میانگین سرعت باد برحسب متر بر ثانیه و نیروی چگالی باد برحسب وات بر متر مربع آمده است. با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی و حداقل مربعات، مقادیر شکل و مقیاس توزیع ویبول برای ایستگاه‌های مدنظر در سطوح جداگانه محاسبه شده است. همگی مقادیر و تجزیه و تحلیل‌ها میانگین سالانه هستند. اهمیت ارزیابی سرعت سالانهٔ باد این است که شرکت‌های فعال در زمینهٔ تولید انرژی بادی، ابتدا به میانگین سالانهٔ سرعت باد و تولید انرژی در مقیاس سالانه توجه می‌کنند و در گام بعدی به جزئیات در قالب فصل و ماه توجه می‌کنند.

جدول ۲- تجزیه و تحلیل پارامترهای باد در هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین

مأخذ: یافته‌های تحقیق، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد $W/m^2/h$
بروجرد	حداکثر درست نمایی	۲/۲۳۱	٥/٥٥۷	٤/۹	۱۲۷
	حداقل مربعات	۲/۲۱۲	٥/٥۸٤	٤/۹	۱۲۸
الیگودرز	حداکثر درست نمایی	۱/۷٥۷	٤/۳۹٤	۳/۹	۸۰
	حداقل مربعات	۱/۹۲٥	٤/۳٤۹	۳/۸	٦۹
الشتر	حداکثر درست نمایی	۲/۲٦٥	٥/٦۱٦	٤/۱	۱۰۳
	حداقل مربعات	۲/۲٤٤	٥/٦۳۲	٤/۱	۱۰٥
کوهدشت	حداکثردرست نمایی	۲/۱۸۰	۳/۸۸٤	۳/٤	٤۳
	حداقل مربعات	۲/۳۰۸	۳/۸۷۷	۳/٤	٤۱

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد $W/m^2/h$
نورآباد	حداکثر درست نمایی	۱/۸۵۱	٤/٥۱۸	٤	٦٦
	حداقل مربعات	۲/۰٤٦	٤/٤۷۳	۳/۹	٥۷
کمالوند	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۰	٥/۰۸٥	٤/٥	۹۸
	حداقل مربعات	۲/۱٦٦	٥/۰۹۷	٤/٥	۹۹
دورود	حداکثر درست نمایی	۱/۹٥۳	۳/۹۱۱	۳/٤	٥۰
	حداقل مربعات	۲/۱٤۰	۳/۸۸۲	۳/٤	٤٤
ازنا	حداکثر درست نمایی	۲/۳٦٤	٤/۹۱٦	٤/۳	۸۳
	حداقل مربعات	۲/۳۰۷	٤/۹۳٦	٤/۳	۸٦



شکل ۳- نمودار گلباد میانگین سالانهٔ هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین

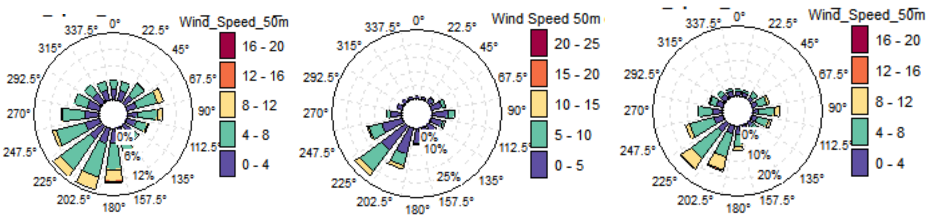
مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

شکل ۳ گلباد سالانهٔ هریک از ایستگاه‌ها را در ارتفـاع ۳۰ متـری از سـطح زمـین نمـایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در ایستگاه‌های بروجـرد، الیگـودرز، الشـتر، نورآبـاد و کمالونـد جهت باد غالب جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدشت و دورود جهت بـاد غالـب شـمال شرقی است.

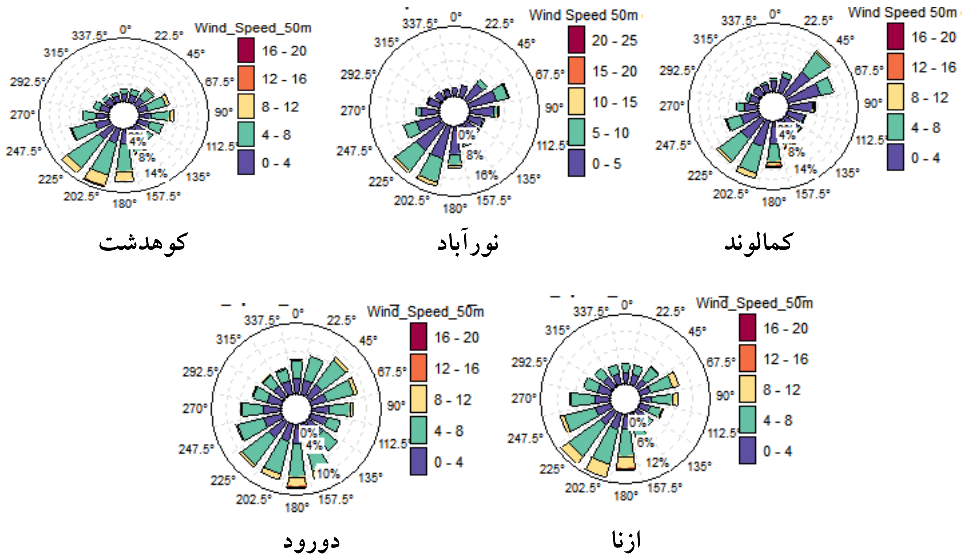
جدول ۳- تجزیه و تحلیل پارامترهای باد در هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

مأخذ: یافته‌های تحقیق، **۱۳۹۸**

نیروی چگالی باد $W/m^2/h$	میانگین سرعت باد m/s	ویبول c	ویبول k	الگوریتم	نام ایستگاه
۱۵۷	۵/۳	۵/۹۵۸	۲/۲۳۹	حداکثر درست نمایی	بروجرد
۱۵۹	۵/۳	۵/۹۹۸	۲/۲۱۲	حداقل مربعات	
۱۰۰	۴/۲	۴/۷۲۰	۱/۵۷۷	حداکثر درست نمایی	الیگودرز
۸۶	۴/۱	۴/۶۷۱	۱/۹۲۹	حداقل مربعات	
۱۲۸	۴/۹	۵/۶۱۶	۲/۲۶۵	حداکثر درست نمایی	الشتر
۱۳۰	۴/۹	۴/۱۷۲	۲/۲۴۴	حداقل مربعات	
۵۴	۳/۶	۴/۱۶۴	۲/۱۸۰	حداکثر درست نمایی	کوهدشت
۵۱	۳/۶	۴/۱۶۴	۲/۳۰۸	حداقل مربعات	
۸۲	۴	۴/۵۱۸	۱/۸۵۱	حداکثر درست نمایی	نورآباد
۷۱	۳/۹	۴/۴۷۳	۲/۰۴۶	حداقل مربعات	
۱۲۱	۴/۸	۵/۴۶۲	۲/۱۹۰	حداکثر درست نمایی	کمالوند
۱۲۳	۴/۸	۵/۴۷۵	۲/۱۶۶	حداقل مربعات	
۶۲	۳/۶	۴/۲۰۱	۱/۹۵۳	حداکثر درست نمایی	دورود
۵۵	۳/۶	۴/۱۶۹	۲/۱۴۰	حداقل مربعات	
۱۰۶	۴/۶	۵/۲۸۰	۲/۳۶۴	حداکثر درست نمایی	ازنا
۱۰۳	۴/۷	۵/۳۰۴	۲/۴۱۶	حداقل مربعات	



بروجرد　　الیگودرز　　الشتر



شکل ٤- نمودارگلباد میانگین سالانهٔ هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

شکل ٤ نمودار گلباد سالانهٔ هریک از ایستگاه‌های مدنظر را در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جهت باد غالب در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز، الشتر، نورآباد و کمالوند جهت غالب جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدشت و دورود جهت باد غالب شمال شرقی است. در ایستگاه ازنا نیز جهت باد غالب جنوبی است.

جدول ٤- تجزیه و تحلیل پارامترهای باد در هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰۰ متری از زمین

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۸

نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد W/m²/h
بروجرد	حداکثر درست نمایی	۲/۲٤۰	٦/۵۹٤	٦/۳	۲۱۰
	حداقل مربعات	۲/۲۲۰	٦/٦۰۹	٦/۳	۲۱۳
الیگودرز	حداکثر درست نمایی	۱/۷۵۹	۵/۲۰۱	٤/٦	۱۳۳
	حداقل مربعات	۱/۹۲۸	۵/۰۱٤	٤/۵	۱۱۵
الشتر	حداکثر درست نمایی	۲/۲۸۵	٦/۱۸۸	۵/٤	۱۷۱
	حداقل مربعات	۲/۲٤۹	٦/۲۰۵	۵/٤	۱۷٤

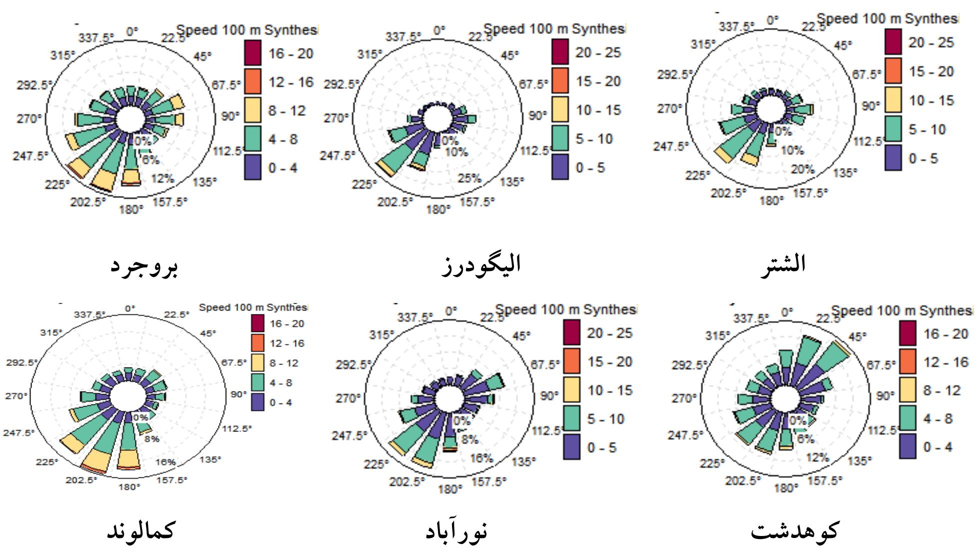
نام ایستگاه	الگوریتم	ویبول k	ویبول c	میانگین سرعت باد m/s	نیروی چگالی باد W/m ² /h
کوهدشت	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۰	٤/٥٩٧	٤	۷۲
	حداقل مربعات	۲/۳۰۹	٤/٥٨٨	٤	٦۹
نورآباد	حداکثر درست نمایی	۱/۸٦۰	٤/۹۷۸	٤/٤	۱۰۹
	حداقل مربعات	۲/۱٤۰	٤/۹۲۸	٤/۳	۹٥
کمالوند	حداکثر درست نمایی	۲/۱۹۹	٦/۰۱۹	٥/۳	۱٦۲
	حداقل مربعات	۲/۱۸٥	٦/۰۳۲	٥/۳	۱٦٥
دورود	حداکثر درست نمایی	۱/۹۸۰	٤/٦۲۹	٤/۱	۸۲
	حداقل مربعات	۲/۱٦٦	٤/۹٥۳	٤	۸۳
ازنا	حداکثر درست نمایی	۲/۳۹۸	٥/۸۱۹	٥/۱	۱۳۸
	حداقل مربعات	۲/٥۱۰	٥/۸٤٤	٥/۱	۱٤۲

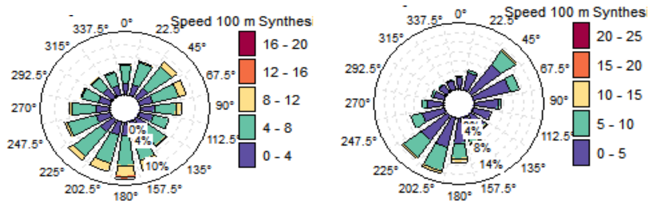
جدول ٥- میزان درصد عدم قطعیت هریک از برآوردها در سطوح مدنظر

مأخذ: نگارندگان،۱۳۹۸

درصد عدم قطعیت در هریک از ایستگاه‌های بررسی‌شده	m/s۰/۷٥ -+

درصد عدم قطعیت هریک از برآوردها در سطوح مدنظر در ایـن پـژوهش، بـا اسـتفاده از رابطهٔ ۱۲ محاسبه شده است.





ازنا **دورود**

شکل ٥- نمودارگلباد میانگین سالانهٔ هریک از ایستگاه‌ها در ارتفاع ١٠٠ متری از سطح زمین

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٨

شکل ٥ گلباد هریک از ایستگاه‌های مدنظر را در ارتفاع ١٠٠ متری از سطح زمین نشان می‌دهد. در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز، الشتر، نورآباد و کمالوند جهت باد غالب جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدشت، دورود و ازنا جهت باد غالب شمال شرقی است. در این پژوهش با استفاده از گلبادها می‌توان بازهٔ سرعت باد هریک از ایستگاه‌ها را مشاهده کرد.

٥. نتیجه‌گیری

طبیعت منطقه درواقع بهترین راهنمای انتخاب سایت توربین‌های بادی است. همچنین، تهیهٔ گلباد منطقه، راهنمای اولیهٔ مناسبی برای امکان استفاده از انرژی بادی است. درواقع گلبادها نمودارهای ترسیمی هستند که توزیع فراوانی جهت و سرعت باد را نشان می‌دهند. براساس توضیحات ذکرشده، در مکان‌یابی سایت توربین‌های بادی باید از وجود بادهای غالب و همیشگی آگاهی وجود داشته باشد و در طول مسیر جهت این بادها کمترین موانع باشد. به‌علاوه، جهت، سرعت باد غالب و تداوم آن نیز عامل بسیار مهمی است و در صورت مناسب‌بودن پتانسیل سرعت باد برای تولید انرژی باید شرایط دیگری از قبیل زمین مناسب، بودجهٔ کافی، نیروی انسانی متخصص و غیره به‌منظور تولید انرژی از نیروی چگالی باد وجود داشته باشد. با وجود این‌ها، تپه‌های وسیع، مسطح و تقریباً گرد، مناسب‌ترین محل نصب توربین هادی هستند. براساس نتایج پژوهش، در ارتفاع ٣٠ متری از سطح زمین، بیشترین سرعت باد در ایستگاه بروجرد ٤/٩ متر بر ثانیه با توان چگالی ١٢٧وات بر متر مربع در ساعت و کمترین سرعت باد در ایستگاه کوهدشت با سرعت ٣/٤ متر بر ثانیه و توان چگالی آن ٤٣

وات بر متر مربع در ساعت محاسبه شد. در سطح ۵۰ متری از سطح زمین، بیشترین سرعت باد در ایستگاه بروجرد ۵/۳ متر ثانیه و توان چگالی باد ۱۵۷ وات بر متر مربع در ساعت و کمترین سرعت باد در این سطح در ایستگاه کوهدشت ۳/٦ متر بر ثانیه با توان چگالی ۵۱ وات بر متر مربع در ساعت برآورد شد. در سطح ۱۰۰ متری از سطح زمین، بیشترین سرعت باد در ایستگاه بروجرد ٦/۳ متر بر ثانیه و توان چگالی باد ۲۱۰ وات بر متر مربع در ساعت و کمترین سرعت باد در ایستگاه کوهدشت ٤ متر ثانیه با توان چگالی باد ۷۲ وات بر متر مربع در ساعت برآورد شد. براساس گلبادهای ترسیم‌شدهٔ جهت باد غالب در همهٔ سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین در ایستگاه‌های بروجرد، الیگودرز ، الشتر، نورآباد و کمالوند، جهت باد غالب سمت جنوب غربی و در ایستگاه‌های کوهدشت، دورود و ازنا جهت باد غالب سمت شمال شرقی است. نتایج یاد شده حاکی از مناسب بودن انرژی پتانسیل باد و امکان احداث توربین بادی در بروجرد، الشتر، نورآباد، ازنا و کمالوند در همهٔ سطوح ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ متری از سطح زمین است. همچنین، از مناسب‌بودن انرژی پتانسیل باد و امکان احداث توربین فقط در سطح ۱۰۰ متری از سطح زمین در الیگودرز، کوهدشت و دورود، کافی‌نبودن انرژی پتانسیل باد در ارتفاع‌های ۳۰ و ۵۰ متری است. با توجه به اینکه از نظر کمّی، متوسط سرعت باد منطقهٔ مدنظر برابر با استانداردهای مورد نیاز برای نصب توربین‌های بادی است، هم‌اکنون امکان تولید نیرو با متوسط سرعت باد موجود از طریق تکنولوژی توربین‌های امروزی وجود دارد.

کتاب‌نامه

۱. انتظاری، ع؛ امیراحمدی، ا؛ عرفانی، ع. و برزویی، ا. (۱۳۹۱). ارزیابی پتانسیل انرژی باد و امکان سنجی احداث نیروگاه بادی در سبزوار. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۳ (۹)، ٤٦-۳۳.

۲. بختیاری، ب؛ بذرافشان، ب. و خانجانی ، م .(۱۳۹۲) .ارزیابی پتانسیل انرژی باد بر مبنای داده‌های کوتاه‌مدت دقیقه‌ای در مناطق کرمان ، جیرفت و بم . *نشریهٔ پژوهش‌های آبخیزداری* ، (۱۰۰)، ۸٤-۷٦.

۳. ثقفی، م. (۱۳۷۲). *انرژی بادی و کاربرد آن در کشاورزی*. چاپ اول. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

٤. رضایی بنفشه، ج؛ جهانبخش، س؛ دین‌پژوه، ی. و اسمعیل پور، م. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی استفاده از انرژی باد در استان های اردبیل و زنجان. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ٤٦ (۳)، ۲۷٤-۲٦۱.

٥. صلاحی، ب. (۱۳۸۳) . پتانسیل سنجی انرژی باد و برازش احتمالات واقعی وقوع باد بـا اسـتفاده از تابع توزیع چگالی احتمالی ویبول در ایسـتگاه‌هـای سـینوپتیک اسـتان اردبیـل. *نشـریهٔ تحقیقـات جغرافیایی* ، (۹۹)، ۸۷-۱۰٤.

٦. عباس‌زاده مزوجی، ز. (۱۳۹۰). *ارزیابی دقت روش‌های معمول بـرآورد داده‌هـای اقلیمـی، مطالعـهٔ موردی: دما و بارش در حوضهٔ آبریز کشف رود مشهد*. (پایـان‌نامـهٔ کارشناسـی ارشـد جغرافیـا). دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

7. Akdağ, S. A., & Dinler, A. (2009). A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, *50*(7), 1761-1766.
8. Asakereh, H., Beyranvand, A., & Doustkamian, M. (2018). Assessment of wind power in the synoptic station of Ardebil. *Spatial Planning*, *8*(30), 65-82.
9. Betz, A. (1966). Introduction to the Theory of Flow Machines. Oxford: Oxford University Press.
10. Bilal, B. O., Ndongo, M., Kebe, C. M. F., Sambou, V., & Ndiaye, P. A. (2013). Feasibility study of wind energy potential for electricity generation in the northwestern coast of Senegal. *Energy Procedia*, *36*, 1119-1129.
11. Billinton, R., Chen, H., & Ghajar, R. (1996). Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy. *Microelectronics Reliability*, *36*(9), 1253-1261.
12. Emna, M. E., Adel, K., & Mimouni, M. F. (2013). The wind energy conversion system using PMSG controlled by vector control and SMC strategies. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, *3*(1), 41-50.
13. Eskin, N., Artar, H., & Tolun, S. (2008). Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *12*(3), 839-851.
14. Kunz, T. H., Arnett, E. B., Erickson, W. P., Hoar, A. R., Johnson, G. D., Larkin, R. P., ... & Tuttle, M. D. (2007). Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *5*(6), 315-324.
15. Mirhosseini, M., Sharifi, F., & Sedaghat, A. (2011). Assessing the wind energy potential locations in province of Semnan in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 449-459.
16. Mohammadi, H., Rostami Jalilian, Sh., & Taghavi, F., Shamsipour, A. A. (2012). Evaluation of wind energy potential in Kermanshah province. *Physical Geography Research*, 44(2), 19-32.

17. Moorthy, C. B., Balasubramanian, C., & Deshmukh, M. K. (2017). Wind turbine output estimation using Windographer software. *International Journal on Future Revolution in Computer Science and Communication Engineering, 24*(3), 33-65.
18. Mpholo, M., Mathaba, T., & Letuma, M. (2012).Wind profile assessment at Masitise and Sani in Lesotho for potential off-grid electricity generation. *Energy Conversion and Management*, *53*(1), 118-127.
19. Rocha, P. A. C., de Sousa, R. C., de Andrade, C. F., & da Silva, M. E. V. (2012). Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. *Applied Energy*, *89*(1), 395-400.